



Denizaltı Direnç Hesabında Farklı Form Parametrelerinin Etkisi

Abdi KÜKNER¹, Metin Kemal GÖKÇE², Ömer Kemal KINACI²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Türkiye

kukner@itu.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0002-3746-4445

mkgokce@yildiz.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0393-3415

kinaci@yildiz.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0002-2956-9562

Öz

Denizaltılar bir donanma için olmazsa olmaz unsurlar olup, savaş durumlarında savaşın kaderini tayin eden kritik sualtı araçlarıdır. Geçen yüzyılda tezahür eden iki dünya savaşının tarihi incelendiğinde, tarafların sahip oldukları deniz teknolojileri arasındaki küçük farklar savaşın kaderini tayin etmiştir. Bu denli küçük teknolojik farklar dahi savaşlarda büyük getiriler sağlayabildiğinden, gemilerin öndizayn aşamasında yapılan çalışmalar oldukça önem kazanmaktadır. Denizaltı dizaynı teknolojik ve hidrodinamik açıdan iyi bir şekilde yapıldığında, düşük direnç ve yüksek hız değerlerine ulaşılabilmekte ve bu durum da denizaltıları çok daha etkili konumlara getirebilmektedir. Denizaltı formlarının gelişimi tipik bir hal almış, paralel orta gövdenin başında ve kıçında yumuşak geçişlere sahip kıvrımlardan oluşmaktadır. Bu çalışmada takintsiz denizaltı gövdesi etrafındaki hidrodinamik özelliklerin incelenmesi adına, farklı genişlik-derinlik (B/D), genişlik-boy (B/L) ve ön gövde boyu-toplam boy (L_p/L) oranlarına sahip üç farklı takintsiz denizaltı gövde grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu denizaltı gövde gruplarının hidrodinamik analizlerinin yapılması için RANS tabanlı ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu kullanılmıştır. Ticari kod ilk önce, literatürde deney sonuçları bulunan bir geometri üzerinde denenmiştir. Uygulanan HAD tekniğinin deney sonuçlarıyla uyumu gözlemlendikten sonra, çalışma kapsamında incelenmek istenen denizaltı grupları benzer sayısal yapı kullanılarak analiz edilmiş ve farklı formların toplam direnç üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizaltı, Gemi Direnci, Form Faktörü, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

Effect of Different Form Parameters on the Estimation of Submarine Resistance

Abstract

Submarines which can change the direction of a war are unique units of a navy. Even little differences in naval technology between the sides provided great advantages to the superior side during the World War II. As small technological differences can have big advantages, the design stage of such critical watercrafts are of great significance. If the design stage of a submarine is successfully fulfilled in terms of hydrodynamic and technological aspects, low resistance at high velocities are achievable, which makes submarines more effective. Submarine hull have conventional form types; parallel middle body, fore and aft body having smooth curves. In the present study, in order to get a better understanding of hydrodynamic characteristics of these watercrafts, 3 groups of bare hull submarine models which

consist of different breadth to depth (B/D), breadth to length (B/L) and fore length to total length (L_f/L) ratios are created. For the numerical simulations of the model groups, a commercial RANSE based computational fluid dynamics code is used. The CFD methodology is first validated on a well known geometry whose experimental results may be found in the open literature. After the validation of the CFD method, the flow around all the submarine models are simulated using similar numerical techniques and the effects of different form parameters on the total resistance are presented.

Keywords: Submarine, Ship Resistance, Form Factor, Computational Fluid Dynamics.

1. Giriş

Denizaltılar, serbest su yüzeyinin altında ve üstünde seyredilme yeteneğine sahip keşif ve savaş maksatlı deniz taşıtlarıdır. Tarihi ortaçağlara dayanan ve günümüzde gelişimleri hala devam bu deniz taşıtları donanmaların olmazsa olmaz unsurları olup, özellikle II. Dünya Savaşı'nda oldukça önemli rol oynamışlardır. Derinden gitmeleri onları hem görünmez kılmakta hem de serbest su yüzeyinde dalga oluşturmama özelliği verdiği için dolayı daha düşük dirençlere maruz kalmalarını sağlamaktadır. Her geçen gün gelişen silah teknolojisi sayesinde yeni nesil torpido, füze ve konumlandırma sistemleri onları çok daha ciddi tehditler haline getirmektedir. Haberleşme ve elektronik teknolojisindeki son gelişmeler sayesinde, uzak bir konumdan veya uydudan rahatlıkla kontrol edilebilen insansız denizaltı araçlarını deniz savaşlarında önemli bir noktaya gelmiştir. Personel kaybı riski olmaması ve küçük ebatları sayesinde fark edilmelerinin zor olması bu tip araçları ülkemizde son zamanlarda gündeme taşımıştır.

Diğer bütün alanlarda olduğu gibi teknolojinin gelişmesi, hidrodinamik özelliklerin incelenmesi konusunda da avantajlar sağladığından denizaltıların hidrodinamik özellikleri üzerine yeni çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin sonucu olan daha güçlü hesaplama sistemleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında çalışan bilim insanlarına büyük imkanlar sunmuş ve daha karmaşık hidrodinamik problemlerin üzerine gidilmesine olanak tanımıştır. Viskozitenin

dahil edilmediği potansiyel tabanlı çözümler tamamen terkedilmese de günümüzde artık birçok kullanıcı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri (RANSE) tabanlı sonlu hacimler metoduyla çalışan kodlara yönelmiştir. Bünyesinde türbülans modelleri de barındıran RANSE tabanlı bu kodların ve güçlü bilgisayarların yardımıyla, oldukça zorlu bir alan olan gemi hidrodinamiği alanında ve denizaltılar konusunda literatürde mevcut bir çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Moonesun vd. çalışmalarında denizaltının baş ve kış formunu belirleyen katsayılara sahip güç serisi denklemlerinin bu katsayılarını değiştirerek farklı denizaltı gövdeleri oluşturmuşlar ve en düşük direnci oluşturan formu bulmaya çalışmışlardır [1]. Joubert ise geniş çaplı çalışmasında, sistematik bir şekilde oluşturduğu denizaltı formlarının direnç, akış sesi ve basınç dağılımlarını birbirleriyle mukayese etmiştir [2]. Yine aynı şekilde Sarkar vd. insansız denizaltı etrafındaki akışı 4 farklı form için HAD tekniğiyle analiz etmişlerdir [3]. İnsansız denizaltıların daha önce bahsedilen özelliklerinden dolayı bu konuya ilgi giderek artmaktadır. Nouri vd. yine insansız bir denizaltı taşıtının baş ve kuyruk profillerini değiştirerek basınç dağılımlarını incelemişlerdir [4]. Benzer olarak Stevenson vd. farklı boy/çap oranlarındaki insansız denizaltı taşıt formlarını HAD tekniği ile analiz edip mukayese etmişlerdir [5]. Literatürde bu alandaki örnekler çoğaltılabilir.

Denizaltı gövdesi denizaltının en dışındaki katman olup, hidrostatik ve hidrodinamik basınçlara maruz kalan bölümüdür. Denizaltı gövde formunun

seçimi dizayn aşamasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Formun seçiminde rol oynayan bazı önemli parametreler; düşük direnç, genel yerleşim, personel ve uygulanması beklenen operasyon için gerekli yeterli hacim, minimum akış sesi, pervane etrafında minimum kavitasyon oluşumu bunlardan bazılarıdır. Özellikle düşük direnç, denizaltıların karadan çok uzakta ve serbest su yüzeyinin oldukça derin bölgelerinde görev yapabilecekleri düşünüldüğünde sahip oldukları sınırlı enerji sebebiyle hayati önem taşımaktadır [1]. Bu sebeple denizaltılara etkiyen hidrodinamik ve hidrostatik kuvvetlerin hassasiyetle hesaplanması gerekir. Serbest su yüzeyinde dalga oluşturacak kadar yüzeye yakın mesafede seyreden denizaltılara etkiyen direnç bileşenleri, gemilere etkiyen direnç bileşenleriyle benzerlik göstermektedir. Gemi direncini bileşenlerine ayırmada Hughes yöntemi takip edilerek denizaltılara etkiyen direnç bileşenleri viskoz (sürtünme) ve basınç dirençleri olmak üzere iki ayrı gruba ayrılabilir. Viskoz direnç, suyun viskozitesinden kaynaklanan direnç bileşenidir ve denizaltı gövdesine teğet yönde etkimektedirler [6]. Basınç kuvvetlerini de iki ayrı grupta ifade etmek daha doğru olacaktır. Bunlardan birincisi viskoz basınç direnci, gövde yüzeyine dik şekilde etkiyen basınç kuvvetleri olup tamamen denizaltı gövdesinin formuyla alakalıdır. Diğer basınç direnci bileşeni ise dalga direnci olup, denizaltının serbest su yüzeyinde dalga oluşturacak kadar yakın olduğu durumlarda oluşur. Yeterli derinlikte dalga direnci kuvvetleri oluşmayacak, denizaltı gövdesine yalnızca sürtünme ve viskoz basınç direnci etkiyecektir. Denizaltılar bu özellikleriyle gemilerden daha ekonomik sayılabilirler.

Bu çalışmada takıntısız denizaltı gövdesi etrafındaki hidrodinamik özelliklerin incelenmesi adına, farklı genişlik-derinlik (B/D), genişlik-boy (B/L) ve ön gövde

boyu-toplam boy (L_f/L) oranlarına sahip üç farklı takıntısız denizaltı gövde grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan takıntısız denizaltı gövdelerinin hidrodinamik analizin önce, literatürde deney sonuçları bulunan yine takıntısız bir elipsoidin HAD tekniğiyle hidrodinamik analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Oluşturulan 3 grup denizaltı gövde modelleri geometrik olarak doğrulama çalışmasında kullanılan elipsoide çok benzer olduğundan, bu denizaltı gövde modellerine de aynı yaklaşımla HAD analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bütün analizler, denizaltıların dalga oluşturmayacak derinlikte olduğu kabulüyle tek fazlı (hava ve serbest su yüzeyi modellenmemiştir) olarak yapılmış ve dolayısıyla dalga direnci olmadığı varsayılmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen direnç değerleri, yukarıda bahsedilen bileşenlerine ayrılmış ve gruplar arasındaki geometrik farkların form faktörü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

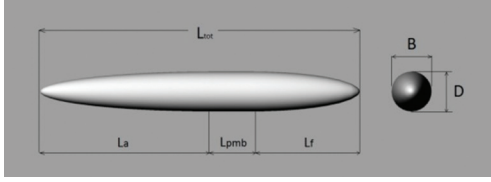
2. Nümerik Hesaplama

2.1. Denizaltı Gövde Modellerinin Oluşturulması

Denizaltı gövdeleri genel olarak 3 kısımda düşünülebilir; baş, paralel orta gövde ve kış. Hidrodinamik dizayn açısından baş formu oldukça önemlidir, öyle ki laminer akış bölgesindeki akışı kontrol eden radar buraya yerleştirilir. Bu bağlamda bu bölgeyi dolgun dizayn etmek faydalı olacaktır. Paralel gövdenin uzunluğu L/D oranını etkileyeceğinden direnci minimum yapan optimum paralel gövde boyu tercih edilmelidir. Kış bölgesinin dizaynındaki ana hedef ise akım ayrılmalarına neden olmayacak ve böylelikle pervaneye düzgün bir akış gönderecek bir form yaratmaktır [8].

Farklı geometrilerin direnç ve form faktörü üzerinde ne gibi etkiler meydana getirdiğini göstermek amacıyla 3 farklı grup

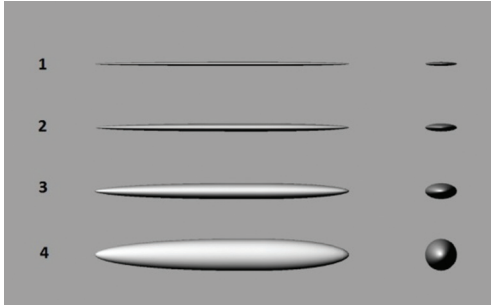
denizaltı gövdesi serisi oluşturulmuştur. Şekil 1’de denizaltı gövde modelinin profil görüntüsü olup, denizaltı gövdesinin ana boyutlarını göstermektedir.



Şekil 1. Denizaltı Gövdesi Modelinin Ana Boyutları

Burada L_a kış gövdesinin boyunu, L_f baş bölgesinin boyunu ve L_{pmb} ise paralel gövde boyunu simgelemektedir. B ve D ise sırasıyla denizaltı gövde modelinin genişliği ve derinliğidir. Birinci ve ikinci grup denizaltı gövde modelleri oluşturulurken $L_a = 4,3D$ ve $L_f = 2,7D$ bağıntılarına sadık kalmıştır.

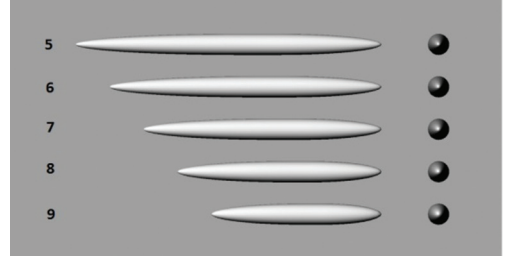
Birinci grup, genişlikleri sabit kalmak koşuluyla, derinlik değerleri değiştirilerek B/D oranları 1, 2, 4 ve 8 olan dört farklı denizaltı gövdesi modelinden oluşmaktadır ve Şekil 2’de toplu halde gösterilmiştir. Bu denizaltı gövde modeli grubunun oluşturulmasındaki amaç derinliğin direnç ve form faktörü üzerindeki etkilerini göstermektir.



Şekil 2. Birinci Grup Denizaltı Gövde Modelleri

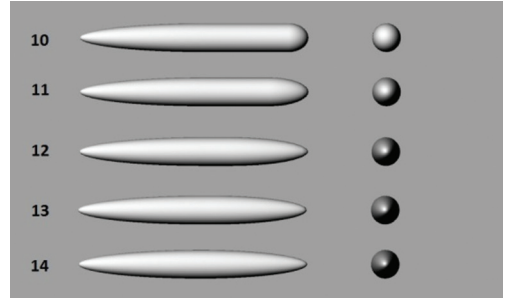
İkinci grup denizaltı modelleri de aynı şekilde genişlik değerleri sabit tutulup (B/D=1), denizaltı boylarının (L) değiştirilerek L/B oranları 8, 9,6, 11,2, 12,8 ve 14,4 olan beş farklı denizaltı gövdesi modelinden oluşmaktadır ve Şekil 3’te toplu halde gösterilmiştir. Bu denizaltı gövde modeli

grubunun oluşturulmasındaki amaç toplam boyun, direnç ve form faktörü üzerindeki etkilerini göstermektir.



Şekil 3. İkinci Grup Denizaltı Gövde Modelleri

Üçüncü grup denizaltı modellerindeki baş ve kış boyları, ilk iki grupta uygulanan prensibin dışında belirlenmiştir. Bu grupta toplam boy L sabit tutulup, ön gövde boyu ve dolayısıyla da paralel gövde boyu ve kış boylarının da buna bağlı olarak değiştirilmesiyle oluşturulmuş ve şekilde toplu halde gösterilmiştir. Oluşturulan denizaltıların L_f / L oranları sırasıyla 0,084, 0,168, 0,337, 0,4 ve 0,462 şeklindedir. Bu grup denizaltı modeli gövdelerinin oluşturulmasındaki amaç, denizaltı baş boylarının direnç ve form faktörü üzerindeki etkilerini göstermektir.



Şekil 4. Üçüncü Grup Denizaltı Gövde Modelleri

Üçüncü grup denizaltı gövde modellerinin görünümü Şekil 4’te verilmiştir. Sayısal analizleri yapılan ve bu bölümde bahsedilen denizaltı modellerinin kısa bir özeti Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmanın amacı denizaltı gövde modellerinin ana boyutlarının direnç ve form faktörü üzerine etkilerini incelemek olduğundan, bütün gruplar takıntısız

Tablo 1. Denizaltıların Form Özelliklerinin Bir Özeti

	Denizaltı No.	Toplam boy	Kıç boyu	Baş boyu	Derinlik	Genişlik	Islak alan (m ²)
GRUP 1	1	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	0,125*D	B	0.322
	2	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	0,25*D	B	0.247
	3	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	0,5*D	B	0.218
	4	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	D	B	0.208
GRUP 2	5	$1,8*L_{tot}$	4,3*D	2,7*D	D	B	0.576
	6	$1,6*L_{tot}$	4,3*D	2,7*D	D	B	0.512
	7	$1,4*L_{tot}$	4,3*D	2,7*D	D	B	0.448
	8	$1,2*L_{tot}$	4,3*D	2,7*D	D	B	0.385
	9	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	D	B	0.322
GRUP 3	10	L_{tot}	4,3*D	0,67*D	D	B	0.346
	11	L_{tot}	4,3*D	1,34*D	D	B	0.337
	12	L_{tot}	4,3*D	2,7*D	D	B	0.322
	13	L_{tot}	4,3*D	3,2*D	D	B	0.316
	14	L_{tot}	4,3*D	3,7*D	D	B	0.311

şekilde oluşturulmuştur. Bütün sayısal analizler sakin su koşulunda yapılmıştır.

2.2. HAD için Akış Çevresinin ve Ağ Elemanlarının Oluşturulması

Doğrulama çalışması ve oluşturulan denizaltı gövde modellerinin hidrodinamik analizlerinde sonlu hacimler metodu prensibiyle çalışan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri (RANSE) tabanlı ticari bir HAD programı kullanılmıştır. Denizaltı modellerinin türbülanslı akışa maruz kalacağı bilindiğinden gerçekleştirilebilir (realizable) k-epsilon türbülans modeli seçilmiştir. Bu türbülans modelinin seçilmesinin nedeni, gemi mühendisliği problemlerinde analiz edilen cisimlerin nispeten narin yapıya sahip olması ve bu türbülans modelinin de bu tür cisimlerin etrafındaki türbülanslı akışı iyi bir şekilde temsil etmesidir [7].

Elipsoit geometrik olarak düşünüldüğünde boyuna ve enine simetrik bir yapıya sahiptir.

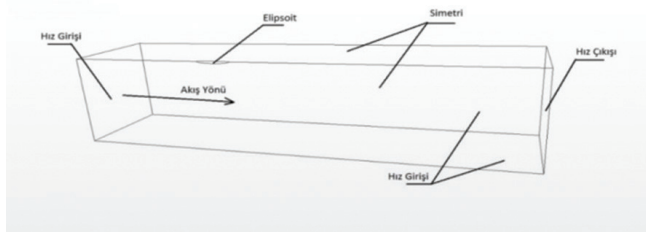
Bu durumda elipsoidin boyuna kesitli halde yarısının, veya hem enine hem boyuna

kesitli halde çeyreğinin hesaplamaya alınmasında bir sakınca yoktur. Bu yöntemin amacı yüksek ağ sayılarından kaçınmak ve böylelikle HAD analizlerinin daha hızlı sonuçlanmasını sağlamaktır. Şekil 5'te görüldüğü gibi gövdenin çeyrek kısmı hesaplamaya alınmış ve akış çevresi yüzeyleri şekildeki gibi tanımlanmıştır.

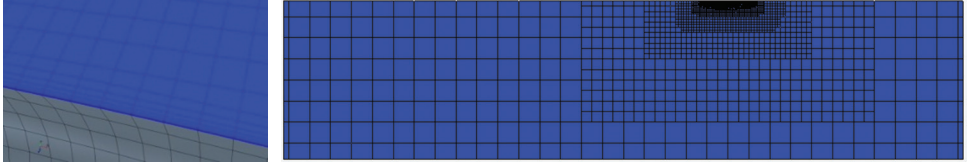
Simülasyonların gövde yüzeyi etrafındaki akışları en iyi şekilde temsil edebilmesi için sınır tabaka kalınlığı hesabı yapılmış ve gövde yüzeyi etrafındaki ağ elemanları bu kalınlık değeri dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 6'da gövde yüzeyi etrafındaki ağ elemanları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Denizaltı sayısal analizlerinde ilgili akış problemi, tek fazlı (sıvı) ve sıkıştırılmaz akışkan kabulü yapılarak çözülmüştür. Analizler zamandan bağımsız (steady) akış yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Akış çevresi 3 boyutlu olarak modellenmiştir ve denizaltı yüzeyleri üzerinde duvar kanunları geçerli olacak şekilde bu yüzeylerdeki hız değerleri 0'dır (no-slip condition).

Şekil 6'dan da görülebileceği gibi bütün



Şekil 5. Akış Çevresinin Genel Görünümü ve Yüzeylerinin Tanımlanması



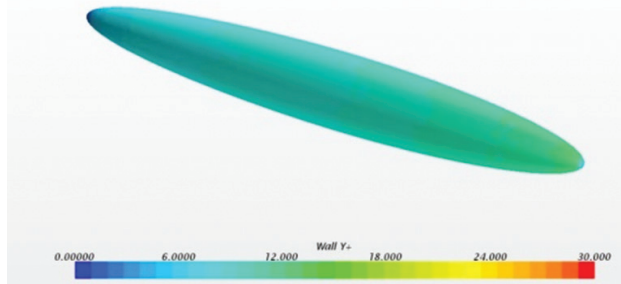
Şekil 6. Gövde Yüzeyi Etrafındaki Ağ Elemanlarının Yakın Plan Görünümü (solda), Akış Çevresi İçerisine Oluşturulan Ağ Elemanlarının Genel Görünümü (sağda)

akış çevresi dörtgen ağ elemanlarına bölünmüş ve eleman boyutları incelenmek istenen denizaltı gövde modeline yaklaştıkça küçültülmüştür. Doğrulama çalışması ve denizaltı gövde model grupları analizlerinde ideal sayıda ağ elemanı oluşturulmuş ve ağ sayısının yeterliliği y^+ hesabı yapılarak teyit edilmiştir. k -epsilon türbülans modelinin iyi sonuç verdiği bilinen y^+ tavan değeri 300'dür [7]. Bir denizaltı gövde modeli analizi sonucunda elde edilen duvar y^+ dağılımı Şekil 7'deki gibi hesaplanmıştır. Şekil 7'de verilen y^+ sonuçlarının, k -epsilon türbülans modelinin iyi sonuç vereceği aralıkta olduğu görülmüştür.

3. Doğrulama ve Ağ Yakınsama Çalışmaları

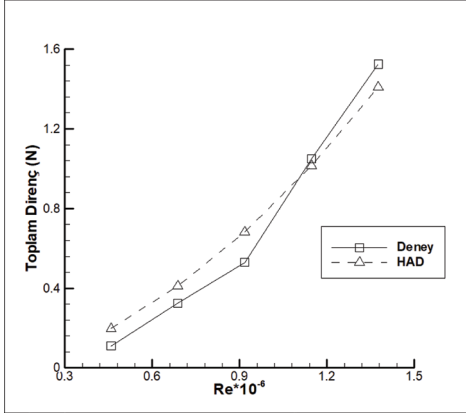
3.1. Doğrulama Çalışması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde incelenmek istenen cisim etrafındaki akışın simülasyonuna başlamadan önce bir doğrulama çalışması yapmak önemlidir. Literatürde deneysel sonuçları bulunan bir fiziksel olayın, uygulanması düşünülen HAD tekniğiyle gerçekleştirilen simülasyonunun sonuçları deney sonuçlarıyla ne kadar uyumlu olursa, uygulanan HAD tekniği o kadar başarılı kabul edilir. Bu bağlamda literatürde deneysel sonuçları bulunan bir elipsoit etrafındaki akışın, yukarıda anlatılan



Şekil 7. Bir Denizaltı Gövde Modeli Yüzeyinde Hesaplanan y^+ Dağılımı

HAD tekniği ile simülasyonu yapılmış, deney sonuçlarıyla Şekil 8'de ve referans makalede uygulanan HAD sonuçlarıyla şekilde görüldüğü gibi mukayese edilmiştir [9].



Şekil 8. HAD Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Şekil 8'den de görülebileceği gibi, uygulanan HAD tekniğiyle elde edilen toplam direnç değerlerinin, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu söylenebilir. Deneysel sonuçlardaki toplam direnç artışının eğiminin HAD sonuçlarına nazaran bir nebze daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel sebepleri kullanılan türbülans modeli veya akış bölgesindeki ağ yapısıdır. HAD tabanlı sayısal sonuçlarda kullanılan algoritmalar sonuçları belirli bir ölçüde değiştirebilmektedir ancak Şekil 8'de verilen iki sonuç arasındaki farkın çok önemli bir fark olmadığı değerlendirilmiştir. Deney sonuçları ve HAD sonuçları arasındaki küçük farklar, HAD tekniğindeki birçok unsurdan oluşabileceği gibi deney ölçüm hatalarından da meydana gelebilmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç, oluşturulan üç grup denizaltı gövde modeli de aynı HAD tekniğiyle analiz edildiğinde sonuçların güvenilir olacağıdır.

3.2. Ağ Yakınsama Çalışması

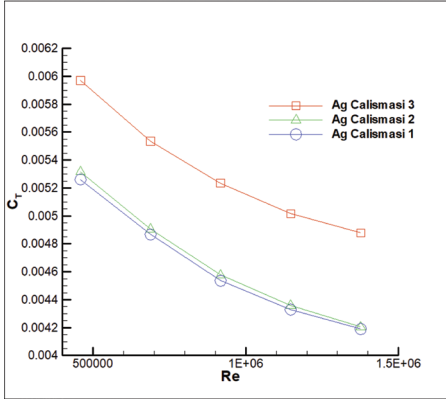
Yapılan doğrulama çalışmasının ardından, HAD analizleri kapsamında oluşturulan ağ sisteminin yakınsama çalışmasını yapmak, HAD analizlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliğini arttıran bir diğer unsurdur. Ağ elemanı sayısı arttıkça, HAD analizlerindeki çözümün daha hassas olacağı bilinmektedir. Eleman sayısının gereğinden fazla olması, bilgisayarlar açısından fazladan çözüm yükü anlamına geldiğinden oluşturulacak yeterli sayıda ağ elemanı sayısının belirlenmesi için ağ yakınsama çalışması yapılır. Bu çalışma; eleman boyutlarının orantılı bir şekilde değiştirilmesiyle akış çevresini farklı sayıda eleman sayısına bölerek, farklı ağ eleman sayılarıyla elde edilen sonuçların birbirleriyle kıyaslanması prensibine dayanmaktadır. Bu çalışmada doğrulama çalışmasında kullanılan elipsoit etrafında, eleman boyutları $\sqrt{2}$ oranında değişen ve eleman sayıları Tablo 2'deki gibi verilen 3 adet ağ yapısı oluşturulmuştur.

Tablo 2. Ağ Yapıları

Ağ Yapısı No.	Eleman Sayısı	Toplam Direnç Katsayısı
1	N=20,000	4.191x10 ⁻³
2	1.5*N	4.205x10 ⁻³
3	2.5*N	4.879x10 ⁻³

Oluşturulan ağ yapılarıyla $Re=1.37 \times 10^6$ için elde edilen analiz sonuçları, Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da yer alan 2 no'lu ağ çalışması, Şekil 8'de görülen mevcut HAD çalışmasında kullanılan ağ yapısı olup, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmişti. Şekil 9 dikkate alındığında, 3 no'lu ağ çalışması deney sonuçlarıyla yakın olan diğer iki ağ çalışması sonuçlarından uzakta sonuçlar vermektedir. 1 no'lu ağ çalışmasının sonuçlarıysa 2 no'lu ağ çalışması sonuçlarıyla benzerdir. Buradan, ağ elemanı sayısının daha fazla arttırılmasının sonuçları çok fazla etkilemeyeceği çıkarılabilir. Ağ yakınsaması sonuçları göstermiştir ki, analizlerde 2

no'lu ağ yapısını tercih etmenin herhangi bir sakıncası bulunmamaktadır.



Şekil 9. Ağ Çalışması Sonuçlarının Karşılaştırılması

4. HAD Analizleri

Bu bölümde farklı denizaltı formlarının direnç ve form faktörü üzerindeki etkilerini göstermek için yapılan HAD analizlerinin sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir.

4.1. Boyutsuzlaştırmanın Önemi

Doğrulama çalışması esnasında karşılaştırma yapılırken toplam dirençler mukayese edilmiştir. Ancak, bütün hesapların boyutlu halde toplam direnç üzerinden yapılması sonuçların genelleştirilmesini engelleyecektir. Bunun yerine toplam direnç boyutsuzlaştırılarak:

$$C_T = \frac{2R_T}{\rho S V^2} \quad (1)$$

formunda verilirse, çözülen denizaltı boyutlarına bakmaksızın karşılaştırmalar yapılabilir. Burada R_T hesaplanan toplam direnç değeri, ρ suyun yoğunluğu ($\rho=997.561 \text{ kg/m}^3$), S ıslak yüzey alanı ve V ise ileri hızı simgelemektedir. Toplam direnç boyutsuzlaştırılarak denklem no. (1)'deki formunda incelenmediği sürece yapılacak kıyaslamalar anlamsız olacaktır. Örneğin grup 1'deki denizaltılardan en dolgun olanının veya grup 2'deki denizaltılardan en uzun olanının en yüksek toplam direnci

vereceği aşıkardır. Çünkü bu iki gruptaki söz konusu denizaltılar, kendi grupları içerisindeki denizaltılar arasında en yüksek ıslak alana sahip denizaltılardır. Bu sebeple boyutsuz toplam direnç katsayılarının karşılaştırılması formlar hakkında daha doğru bilgi verecektir.

4.2. Oluşturulan Denizaltı Gövde Model Gruplarının HAD Analizleri

Doğrulama çalışmasında alınan uyumlu sonuçlar üzerine, benzer HAD analiz mantığı ve parametreleri kullanılarak, oluşturulan denizaltı gövde modellerinin analizlerine geçilmiştir. Bütün analizlerde uygulanan HAD tekniği doğrulama çalışmasındaki gibi olup, analizler sonuçların yeterli derecede yakınsayacak kadar sürdürülmüştür. Bütün analizler zamandan bağımsız, tek fazlı ve denizaltı gövde modelleri sabit konumda olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Analizler 5 farklı hız değeri için yapılmıştır; 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5 m/s. Söz konusu hızlar ve Tablo 1'deki denizaltı boyutları dikkate alındığında Reynolds sayısı $4 \cdot 10^4 < Re < 2,5 \cdot 10^6$ aralığında değişmektedir. Toplam direnç, form değişikliklerinin direnç üzerindeki etkisinin görülebilmesi adına sürtünme ve basınç direnci olarak ayrılmış ve kıyaslamalar bu doğrultuda yapılmıştır.

Farklı durumlardaki fiziksel büyüklüklerin birbirleriyle sağlıklı olarak kıyaslanabilmesi için, bu değerlerin boyutsuzlaştırılması gerektiğinden bir önceki bölümde bahsedilmişti. Grafik eksenlerinde verilen toplam direnç denklem no.(1)'deki gibi boyutsuzlaştırılmıştır. HAD analizlerinde sürtünme ve basınç dirençlerinin ayrı elde edilebilmesi sayesinde form faktörü k direkt olarak hesaplanabilmektedir. Form faktörü;

$$k = \frac{R_{PV}}{R_F} \quad (2)$$

olarak verilmektedir. Burada R_F sürtünme direncini, R_{PV} ise viskoz basınç direncini simgelemektedir. Denklem 2'den

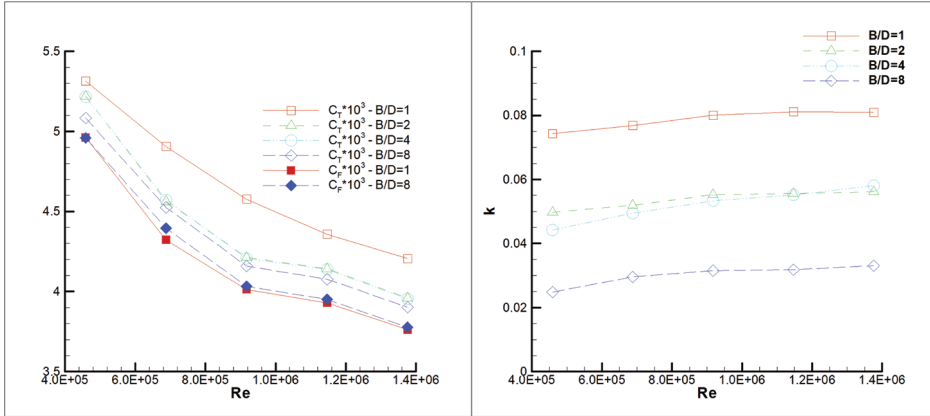
anlaşılabileceği gibi form faktöründe boyutsuz bir sayıdır. Grafiklerdeki hız değeri ise yine bir boyutsuz sayı olan Reynolds sayısı (Re) şeklinde verilmiştir. Reynolds sayısı ise;

$$Re = \frac{\rho V L_{tot}}{\mu} \quad (3)$$

olarak verilmektedir. Burada μ dinamik viskoziteyi temsil etmektedir ($\mu = 8.8871 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$).

4.2.1. Birinci Grup Denizaltı Gövde Modeli HAD Sonuçları

Birinci grupta oluşturulan aynı boya sahip B/D oranları 1, 2, 4 ve 8 olan dört farklı denizaltı gövdesi modeli, bahsedilen 5 farklı hız için analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Birinci Grup Toplam Direnç (sol) ve Form Katsayıları (sağ) Grafikleri

Şekil 10'da soldaki grafikte görüldüğü üzere B/D oranının artması incelenen hız aralığında toplam direnç katsayısını artıran bir faktör olarak öne çıkmaktadır. B/D=2, 4 ve 8 birbirine yakın sonuçlar vermekteyken B/D=1 oranına sahip denizaltının toplam direnç katsayısı diğerlerine nazaran çok daha yüksektir. Buna sebep olarak, söz konusu formun (denizaltı no.4) en dolgun form olması gösterilebilir. Bu da zaten Şekil 10'da sağda verilen form faktörü grafiğinde görülmektedir. Yine Şekil 10'da soldaki resimde B/D=1 ve B/D=8 denizaltıları için

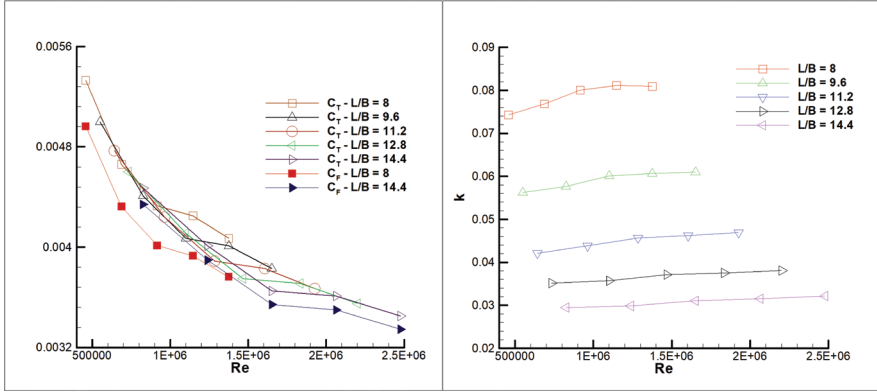
sürtünme katsayısı grafikleri de verilmiştir. Bu iki denizaltının sürtünme katsayıları neredeyse aynıyken, toplam direncin B/D=1 denizaltısında gözle görülür bir biçimde yüksek olması, viskoz basınç direncinin fazla olduğunun başka bir kanıtıdır.

Bilindiği üzere form faktörü k , yüzen cisimlerde genel olarak cismin dolgunluğuyla ilgili bir ifadedir. İçerisinde mürettebat bulunduracak gerçek bir denizaltının bu denli yüksek B/D oranlarına sahip olamayacağı açıktır. Ayrıca B/D oranının artması denizaltının hacmini azaltacağından çok düşük B/D oranlarının tercih edilir olmadığı söylenebilir. Sonuç olarak uygulanması çok mümkün olmasa da birinci grup denizaltılarda yapılan hesaplar, B/D oranındaki artışın direnç katsayısı ve form faktörünü düşürdüğünü göstermiştir.

4.2.2. İkinci Grup Denizaltı Gövde Modeli HAD Sonuçları

İkinci grupta oluşturulan aynı genişliğe sahip ancak L/B oranları 8, 9,6, 11,2, 12,8 ve 14,4 olan denizaltı gövde modelleri için yapılan HAD analizleri neticesinde Şekil 11'deki sonuçlar alınmıştır.

Aslında genel olarak bilinen kısa ve dolgun denizaltıların uzun ve narin denizaltılara nazaran daha yüksek dirence neden olduğu bilgisi Şekil 11'de verilen grafiklerde de teyit edilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere en uzun form olan denizaltı



Şekil 11. İkinci Grup Toplam Direnç (sol) ve Form Katsayıları (sağ) Grafikleri

no. 5 en az toplam direnç katsayısına sahip form olmuştur. Bunun sebebi Şekil 10'da aranabilir. Söz konusu şekil incelendiğinde en düşük form faktörüne sahip olan formun yine denizaltı no.5 olduğu görülecektir. Ancak bu noktada Şekil 11'deki grafiklerin farklı Reynolds sayıları aralığında olduğuna dikkat çekilmelidir. Bunun sebebi denizaltı toplam boyu L_{tot} 'un denizaltı formlarında değişiyor olmasıdır. Dolayısıyla en az toplam direnç katsayısı denizaltı no.5'te iken, aynı form toplam direnç açısından mukayese edildiğinde en az değere sahip olmayabilir. Bunun sebebi bu formun diğerlerine nazaran daha fazla ıslak alana sahip olmasından ileri gelmektedir. Ancak uzun ve narin form tercih edilerek, denizaltı toplam hacmi dirençte küçük bir artış karşılığında önemli ölçüde artırılabilir. Dolayısıyla 5 no.'lu denizaltının birçok mühendis tarafından kendi grubundaki diğer denizaltılara nazaran daha çok tercih edileceği öngörülebilir.

Dikkate değer diğer bir husus ise boy artışının sürtünme direnci katsayısı C_F üzerindeki etkisidir. Bilindiği üzere ITTC'57 formülasyonu;

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (4)$$

olarak verilir. Burada Re, (3) no.'lu denklem ile tanımlanmıştır. Toplam denizaltı

boyunun uzaması Reynolds sayısını artıracığından sürtünme direnci katsayısı C_F 'i azaltacaktır. C_F ise denizaltı toplam direnç bileşenlerinden birisidir:

$$C_T = C_F + C_{PV} \quad (5)$$

Denizaltılar genellikle derin sularda çalıştıklarından (5) no.'lu denklemde de dalga direnci etkisi bulunmamaktadır. Dolayısıyla $C_w=0$ olarak alınmıştır.

(5) no.'lu denklem doğrultusunda sürtünme direnci azalmasının toplam direnci de azaltan bir husus olduğu görülmektedir. Bu da ikinci grup toplam direnç sonuçlarına yansımıştır. Şekil 11'de verilmiş olan C_F değerleri de bu açıklamanın doğru olduğunu niteler biçimindedir.

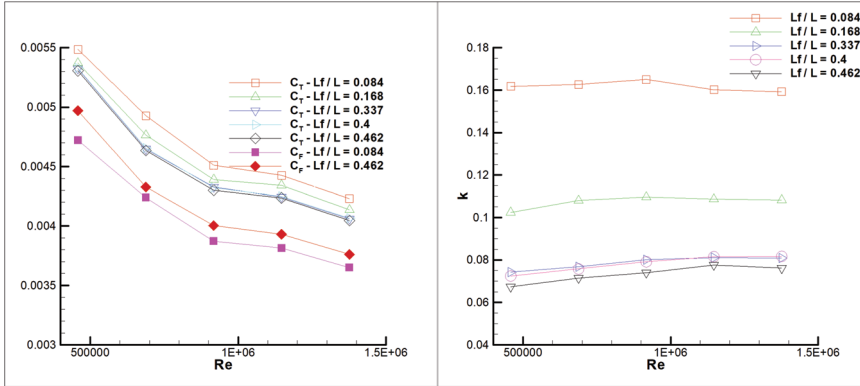
L/B oranının artması toplam direnç katsayısını ve form faktörünü düşürmektedir. Bu oranın artabilmesi için ya L değerinin artması ya da B değerinin düşmesi gerekmektedir. Bu uygulamalar pratikte çok uygulanabilir değildir. Çünkü L değerinin sabit tutulup B değerinin küçültülmesi denizaltı hacmini düşürecek ve kaldırma kuvvetinde kayıplara neden olacaktır. B değeri sabit tutulup L değerini artırmak da çok mümkün değildir. Bu safhada denizaltı çok fazla uzayacak ve buna bağlı olarak da mukavemet sorunları ortaya çıkacaktır.

4.2.3. Üçüncü Grup Denizaltı Gövde Modeli HAD Sonuçları

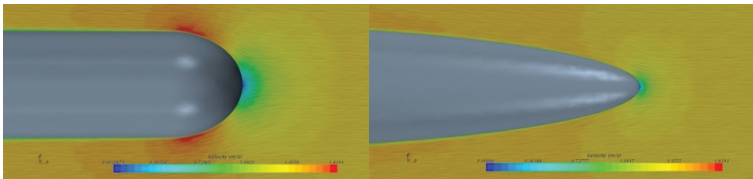
Son olarak üçüncü gruptaki aynı boydaki ancak L_f / L oranları 0,084, 0,168, 0,337, 0,4 ve 0,462 olan 5 denizaltı gövdesi modelinin HAD analizleri sonucu Şekil 12'deki gibi hesaplanmıştır. Baş boyu uzatılırken toplam boy ve kışık boyu sabit tutulmuş, paralel gövde boyu kısaltılmıştır. Uzun baş boyuna sahip denizaltıların her hızda kısa baş boyuna sahip denizaltılara nazaran daha az dirence sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca kısa baş boyuna sahip denizaltıların form katsayılarının da uzun baş formuna sahip denizaltılara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Form faktörü genel anlamıyla gemi direncinde geminin dolgunluğuyla ilintili olarak bilinmektedir. Üçüncü grup denizaltı formlarında deplasman (neredeyse) sabit tutulmasına karşın, kısa baş boyuna sahip denizaltıların daha yüksek form faktörüne sahip olduğu görülmüştür (baş boyu uzatılıp paralel gövde kısaltıldığında çok küçük bir miktar deplasman kaybolmaktadır). Bu durum en kısa baş boyuna sahip denizaltı ile en uzun

baş boyuna sahip denizaltının sürtünme katsayıları arasındaki farkın toplam direnç katsayıları arasındaki farktan az olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca kısa tutulan baş tarafta daha erken akım ayrılması beklendiğinden bunun viskoz basınç direncini olumsuz etkileyeceği tahmin edilebilir. Uzun baş formları suyu daha yumuşak yararak akım ayrılmasını geciktirebilecekken, kısa baş formuna sahip denizaltılarda bu durumun tam tersi tezahür etmekte ve dolayısıyla denizaltı gövdesiyle beraber bir miktar çürük suyu da gereksiz yere taşımaktadır. Bu da fazladan dirence sebep olacak ve gereksiz yere makine gücünden yiyecektir.

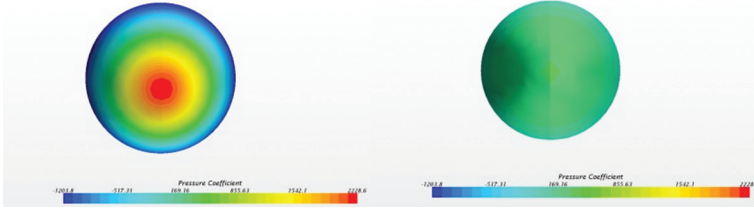
Şekil 13'te en düşük L_f / L oranına sahip model ile en yüksek L_f / L oranına sahip modelin baş taraflarındaki akım hız konturları verilmiştir. Resim incelendiğinde kısa baş formuna sahip denizaltının baş tarafındaki akım hızı daha yüksektir. Bunun yanında hız değişimi de uzun baş formu denizaltına oranla daha fazladır. Denizaltı formunun üzerindeki hızlar farkının bu denli yüksek oluşu aynı zamanda yüksek basınç gradyanı oluşturur. Birbirine yakın



Şekil 12. Üçüncü Grup Toplam Direnç (sol) ve Form Katsayıları (sağ) Grafikleri



Şekil 13. $L_f/L = 0,084$ Denizaltı Gövdesinin Baş Kısmında Hesaplanan Hız Vektörleri (sol) $L_f/L = 0,462$ Denizaltı Gövdesinin Baş Kısmında Hesaplanan Hız Vektörleri (sağ)



Şekil 14. $L_f / L = 0,084$ Denizaltısının Baş Kısmında Hesaplanan Basınç Katsayısı Dağılımı (sol)
 $L_f / L = 0,462$ Denizaltısının Baş Kısmında Hesaplanan Basınç Katsayısı Dağılımı (sağ)

noktalar arasındaki yüksek basınç farkı ise akım ayrılmasına sebebiyet vereceğinden, denizaltı hareketi esnasında bir miktar çürük suyu da beraberinde taşır.

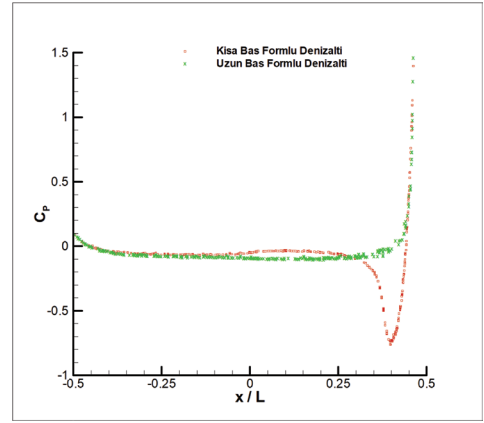
Viskoz basınç direncini etkileyen diğer bir unsur da denizaltının ön ve arka bölgelerindeki basınç farkıdır. Denizaltının baş tarafı küt olduğunda bu bölgedeki basınç Şekil 14'teki gibi daha yüksek olur. Şekil 14'te verilen iki resim için basınç aralıkları eşit tutulmuştur. Soldaki resimde form daha küt bir baş formuna sahip olduğundan belirli bölgedeki basınç daha yüksektir. Sağdaki resimde ise baş formu daha sivridir ve dolayısıyla basınç belirli bir bölgede yoğunlaşmamış, tam tersine denizaltının tüm baş formu boyunca yayılmıştır.

Şekil 15'te sırasıyla en düşük ve en yüksek L_f / L oranlarına sahip modellerin orta kesidi üzerindeki basınç katsayısı dağılımları görülmektedir. Şekildeki basınç katsayısı,

$$C_p = \frac{P}{\rho S V^2} \quad (6)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada P toplam basıncı temsil etmekle birlikte, hidrostatik ve mutlak basınç P içerisinde yer almamaktadır. Bu şekilde de daha önceki yorumları destekler nitelikte kısa baş formu denizaltı üzerindeki basınç gradyanının uzun baş formu denizaltıya kıyasla daha büyük olduğu görülecektir. Şekil 13'te kısa baş formu denizaltı üzerinde verilen yüksek akım hızlı bölge

Şekil 15'te basıncın en düşük olduğu bölgeye tekabül etmektedir. Bu bölgenin denizaltının geri kalan kısmıyla olan basınç farkı direnci artırıcı bir unsur olmuştur.



Şekil 15. Denizaltı No. 10 ve 14 Orta Kesitleri Üzerindeki Basınç Katsayısı Dağılımları

5. Sonuçlar

Bu çalışmada üç farklı denizaltı grubu ele alınarak farklı form parametrelerinin denizaltı toplam direnci ve form faktörü üzerine etkisi incelenmiştir.

Birinci grup denizaltılarda genişlik B sabit tutularak derinlik D değiştirilmiştir. Derinliğin azaltılması, toplam direnci ve form faktörünü azaltmaktadır. Bunun yanında deplasman derinliğin azalmasıyla değiştiği için bu husus da gözden kaçırılmamalıdır.

İkinci grup denizaltılarda genişlik B ve derinlik D sabit tutulmuş, toplam boy L_{tot} uzatılmıştır. L_{tot} uzatılırken baş ve kık boyları da homojen olarak uzamıştır.

Toplam boyun uzaması toplam direnç katsayısını ve buna mukabil olarak form faktörünü azaltmaktadır. Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken husus, toplam direncin azalmayacağıdır. Denizaltı toplam boyu uzadığında ıslak alan artacağından toplam direncin artması beklenmektedir.

Üçüncü grup denizaltılarda ise denizaltı baş boyunun etkisi incelenmiştir. Bu grup denizaltılarda toplam boy ve kış boyu sabit tutulmuştur. Denizaltı baş boyu uzatılırken, paralel gövde boyu kısaltılmıştır. Deplasman ise neredeyse sabit tutulmuştur. Baş boyunun artırılması toplam dirence ve form faktörüne olumlu olarak yansımıştır. Ancak denizaltıların genellikle baş tarafında bulunan sonar dom sebebiyle bu bölgenin daha kısa tutulması ve sonar doma gelen akım hızının mümkün olduğunca laminer olması istendiğinden, baş boyunu artırırken dikkat edilmelidir.

Üçüncü grup denizaltında ıslak alan sabit tutulduğundan toplam dirençteki artışın yalnızca viskoz basınç direncinden kaynaklandığı söylenebilir. Sürtünme direnci genel olarak ıslak alanla ilgili olduğundan üçüncü grup denizaltılarda farklı formların sürtünme direnci üzerinde herhangi bir etkisi beklenmemektedir. Birinci ve üçüncü grup denizaltılarda ise ıslak alan değiştiğinden toplam dirençteki değişiklik hem sürtünme hem de viskoz basınç direncine atfedilebilir.

Kaynaklar

- [1] Moonesun, M., Karol, Y. M., Dalayeli, H., Tahvildarzade, D., Javadi, M. ve Jelokhaniyan, M. (2015). Power series optimization for submarine bare hull form. *Turkish Journal of Engineering, Science and Technology*, 2015:(01):11-19.
- [2] Joubert, P. N. (2006). Some Aspects of Submarine Design Part 2. Shape of a Submarine 2026. Australian Government Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation: 013-761.
- [3] Sarkar, T., Sayer, P. G. ve Fraser, S.M. (1997). A study of autonomous underwater vehicle hull forms using computational fluid Dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1997:25(11):1301-1313.
- [4] Nouri, N. M., Zeinali, M. ve Jahangardy, Y. (2016). AUV hull shape design based on desired pressure distribution. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016:21(2):203-215.
- [5] Stevenson, P., Furlong, M. ve Dormer, D. (2007). AUV shapes - Combining the Practical and Hydrodynamic Considerations. *IEEE/MTS OCEANS Conf.*, 2007.
- [6] Baykal, R. ve Dikili, A. C. (2002). *Gemilerin Direnci ve Makine Gücü*. İstanbul: İTÜ Yayınları.
- [7] Kinaci, O. K. ve Gokce, M. K. (2015). A computational hydrodynamic analysis of Duisburg Test Case with free surface and propeller. *Brodogradnja*, 2015:66(4):23-38.
- [8] Renilson, M. (2015). *Submarine hydrodynamics*. Springer International Publishing.
- [9] Kinaci, O. K., Sukas, O. F. ve Bal, S. (2016). Prediction of wave resistance by a RANSE based computational fluid dynamics approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2016:230(3):531-548.